



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**METODY SNIŽOVÁNÍ AERODYNAMICKÉHO
ODPORU AUTOMOBILŮ**

METHODS OF REDUCING AERODYNAMIC DRAG OF AUTOMOBILES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Šimbera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Čavoj

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Michal Šimbera**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Čavoj**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody snižování aerodynamického odporu automobilů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled obvyklých postupů při snaze o snížení aerodynamického odporu vozidel, a to u modelů vozidel pro výzkumné účely i u běžných automobilů.

Cíle bakalářské práce:

Popis běžných metod snižování aerodynamického odporu u sériově vyráběných automobilů.

Popis nestandardních metod snižování aerodynamického odporu nasazovaných u výzkumných vozů.

Seznam literatury:

WASSEN, E., S. EICHINGER a F. THIELE. Simulation of Active Drag Reduction for a Square-Back Vehicle. In: KING, R. Active Flow Control II [online]. 2010 [cit. 2016-10-17]. DOI: 10.1007/978-3-642-11735-0_16. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-11735-0_16

AIDER, J. L., J. F. BEAUDOIN a J. E. WESFREID. Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. Experiments in Fluids [online]. 2010, vol. 48, issue 5, s. 771-789 [cit. 2016-10-17]. DOI: 10.1007/s00348-009-0770-y. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00348-009-0770-y>

SONG, K. S. et al. Aerodynamic design optimization of rear body shapes of a sedan for drag reduction. International Journal of Automotive Technology [online]. 2012, vol. 13, issue 6, s. 905-914 [cit. 2016-10-17]. DOI: 10.1007/s12239-012-0091-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12239-012-0091-7>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá popisem pasivních a aktivních metod snižování aerodynamického odporu osobních automobilů. Nejdříve je uvedena teorie aerodynamiky a možnosti jejího testování. Dále jsou popsány pasivní aerodynamické prvky užívané v sériové výrobě a na výzkumných vozech, rozdělené podle částí automobilu. Nakonec jsou uvedeny některé prvky aktivní aerodynamiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Snižování spotřeby paliva, Koeficient aerodynamického odporu, Řízení proudění

ABSTRACT

Thesis deals with description of passive and active methods of reducing automotive aerodynamic drag. Firstly is given theory of aerodynamics and its testing methods. Further, split by vehicle parts, passive aerodynamic components used in mass production and on research vehicles are described. Lastly, some components of active aerodynamic are given.

KEYWORDS

Fuel efficiency improvement, Drag coefficient, Flow control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠIMBERA, M. *Metody snižování aerodynamického odporu automobilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Čavoj.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Čavoje a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Michal Šimbera

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Čavojovi za poskytnutí potřebných rad, informací, podkladů a za bezproblémovou komunikaci při řešení této bakalářské práce. Dále děkuji knihovnici Blance Vintrové za ochotu při shánění použitých zdrojů.

OBSAH

Úvod	9
1 Teorie aerodynamiky	10
1.1 Proudění	10
1.1.1 Vizualizace proudění	10
1.1.2 Obtékání vozidla	11
1.1.3 Mezní vrstva	12
1.2 Aerodynamický odpor	12
1.3 Součinitele aerodynamického odporu, vztlaku a boční síly	15
2 Testování aerodynamického odporu	16
2.1 Aerodynamický tunel	16
2.2 Computational Fluid Dynamics	17
3 Pasivní prvky snižování aerodynamického odporu osobních automobilů	18
3.1 Přední část automobilu	18
3.1.1 Přední spoiler	18
3.1.2 Canards	19
3.2 Zadní část automobilu	20
3.2.1 Zadní spoiler	20
3.2.2 Optimalizace zadní části sedanu	21
3.2.3 Výzkum vírových generátorů	22
3.2.4 Výzkum zadního kanálu a zadní prohlubně	24
3.3 Podvozek	24
3.4 Snižování odporu v prostoru kol	25
4 Aktivní prvky snižování aerodynamického odporu osobních automobilů	27
4.1 Aerodynamické režimy aut	27
4.2 Aerodynamická brzda	27
4.3 Aktivní lamely masky chladiče	28
4.4 Výzkum aktivní stabilizace úplavu	28
4.4.1 Využití Coandova efektu	29
4.4.2 Stabilní foukání podél zadních hran	30
4.4.3 Výsuvný zadní difuzor	31
Závěr	32
Seznam použitých symbolů	38
Seznam použitých zkratk	39

ÚVOD

V posledních desetiletích dochází ke zvyšování cen ropy, tudíž i paliva pro osobní automobily. Zároveň je stále více zpříšňována legislativa týkající se regulace emisí CO₂. Tyto faktory vedou v posledních letech automobilové producenty k odklonu od zvyšování výkonu a k zaměření na snižování spotřeby.

Snížit spotřebu lze zlepšením efektivity pohonu, odlehčením vozidla, snížením energetických ztrát v převodech a komponentech, změnou řídičských návyků a redukcí jízdních odporů. Zvyšování efektivity pohonu a použití lehčích materiálů je ale velmi nákladné. Z jízdních odporů převládá při vyšších rychlostech aerodynamický odpor, protože je úměrný druhé mocnině rychlosti. Díky vývoji technologií se rychlosti vozidel stále zvyšují, což činí aerodynamický odpor ještě významnějším. Aerodynamická optimalizace tak dnes představuje důležitou a ekonomickou cestu ke snížení spotřeby.

Aerodynamické prvky však i přes svůj vliv na spotřebu a jízdní vlastnosti nejsou tím, co by automobily prodávalo. Často tak musí ustupovat designu. S postupující dobou se také zvyšují požadavky na bezpečnost, což nutí výrobce automobily zvětšovat a s tím zvětšovat i aerodynamický odpor.

Tvar automobilu je složitý a zvláště svou zadní částí odlišný od tvaru leteckého křídla. Při jízdě tak kolem něj vznikají obtížně definovatelné struktury odtrženého proudění. Z aerodynamického hlediska je nejdůležitější úplav za zadní částí karoserie, který se významně podílí na celkovém aerodynamickém odporu vozidla (30%), dále pak prostor kol (25%) a podvozek (25%). Zbylých 20% připadá na prostor motoru a zbytek karoserie. Převážná většina aerodynamických studií se tak věnuje analýze a řízení proudění úplavu.

Tato práce má za cíl popsat a zhodnotit běžné metody snižování aerodynamického odporu nasazované u vozidel v sériové výrobě a nestandardní metody u výzkumných vozů. Nejdříve se věnuje teorii potřebné pro oporu následujícího popisu aerodynamických prvků, dále pak jejich rozdělení na tzv. pasivní a aktivní a podle částí automobilu, na kterých jsou umístěvány.

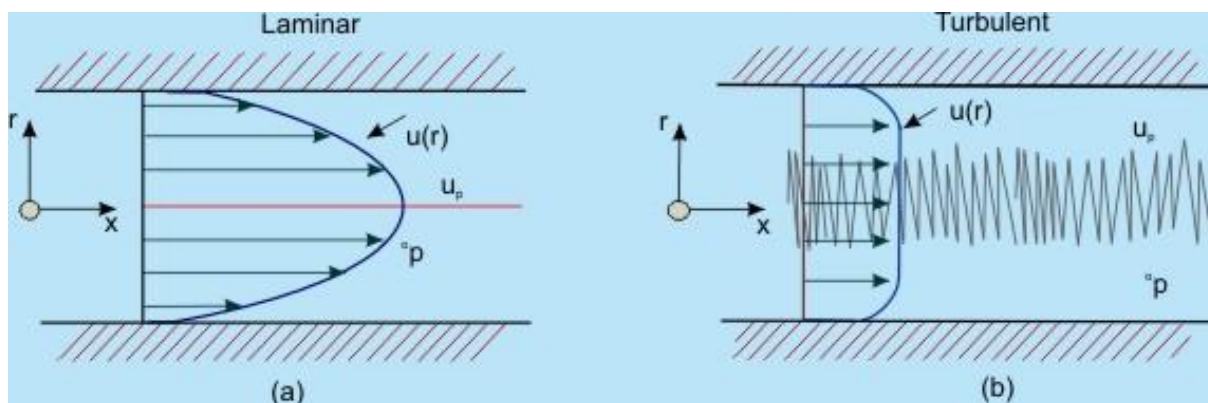
1 TEORIE AERODYNAMIKY

Aerodynamika je fyzikální vědní obor zabývající se prouděním plynů a jejich vzájemným působením s pevnými tělesy. Z principu relativity pohybu je zřejmé, že pohyb tělesa v nehybném plynu je ekvivalentní proudícímu plynu okolo nehybného tělesa. To umožňuje zkoumat aerodynamiku po vozovce jedoucího automobilu jeho umístěním do větrného tunelu.

1.1 PROUDĚNÍ

Ke znázornění proudění se používají proudnice, myšlené křivky trajektorií proudících částic. Vektor rychlosti je v daném místě tečný na proudnici.

Proudění v tekutinách rozlišujeme podle tvaru proudnic na laminární (stacionární) a turbulentní (nestacionární). Při laminárním proudění jsou trajektorie částic rovnoběžné a nedochází k mísení mezi jednotlivými vrstvami tekutiny. Turbulentní proudění je naopak charakteristické porušením spojitého rozložení tekutiny, vlastním pohybem jednotlivých částic a vznikem vírů.



Obr. 1 Srovnání rychlostních profilů v potrubí (a) laminárního a (b) turbulentního proudění [1]

K jejich rozlišení slouží podobnostní Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

kde \bar{v} je střední rychlost proudění, d charakteristický rozměr a ν kinematická viskozita. Při podkritických hodnotách Reynoldsova čísla lze proudění považovat za laminární, při nadkritických za turbulentní.

1.1.1 VIZUALIZACE PROUDĚNÍ

Proudění kolem karoserie lze vizualizovat pomocí několika metod, mezi nejstarší patří použití:

- **wool tufts** – krátké kusy provázků s roztřepenými konci, upevněné na povrchu karoserie, které se vlivem okolo proudícího vzduchu namíří ve směru proudnic

- **kouře** – ten lze vytvořit různými chemickými reakcemi (např. spalování lehkých olejů) a vypouštěný za vhodných podmínek dokáže vizualizovat svazek proudnic [2]

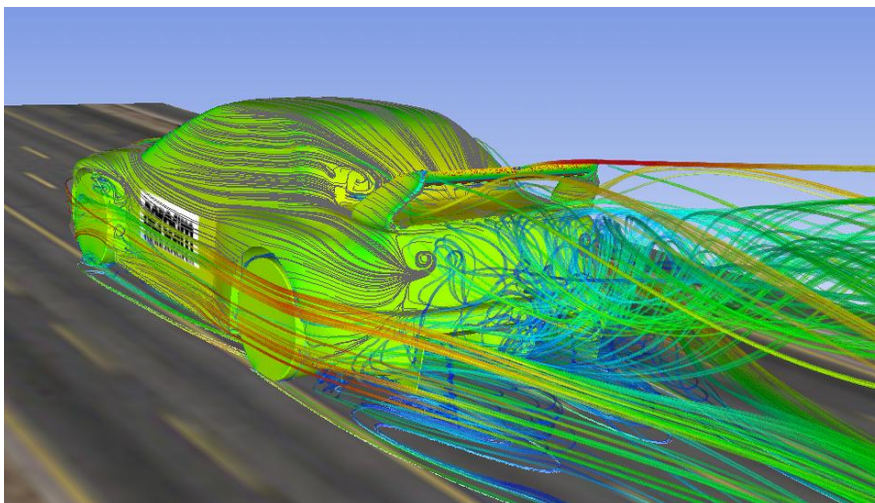


Obr. 2 Vizualizace proudění okolo stíhačky F-18 za použití kouře a tzv. wool tufts [3]

Dále lze z experimentálních metod uvést „flow visualization paint“ – barvy, která se při okolním proudění vzduchu rozteče ve směru proudnic.

1.1.2 OBTÉKÁNÍ VOZIDLA

Proud vzduchu se na čele automobilu rozdělí na 5 částí - obtéká vozidlo pod podvozkem, nad střechou, z boků, a část proudí chladičem do vnitřního systému vozu. Za vozidlem vzniká úplav, oblast silně turbulentního odtrženého proudění. Plynulejší křivky tvaru karoserie vedou ke snížení aerodynamického odporu.

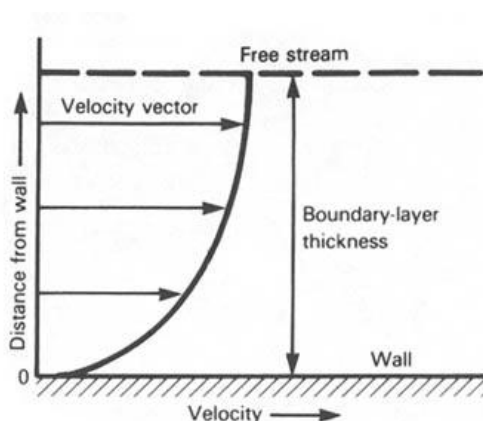


Obr. 3 Post processing simulace vnější aerodynamiky závodního vozu [4]

Na úkor funkčnosti karoserie však naopak v okolí vozu vznikají místa s odtrženým a turbulentním prouděním. V těchto místech je prostor pro použití pasivních nebo aktivních aerodynamických prvků, kterými má tato práce za cíl se zabývat.

1.1.3 MEZNÍ VRSTVA

V těsné blízkosti obtékané karoserie vzniká oblast ovlivněná třením s jejím relativně nehybným povrchem. Děje se tak díky viskozitě vzduchu. Na povrchu tělesa je rychlost rovná rychlosti povrchu, v mezní vrstvě se mění a přechází do maximální rychlosti proudu. [5]



Obr. 4 Profil mezní vrstvy [6]

1.2 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Aerodynamický (nebo také vzdušný) odpor je jeden z jízdních odporů. Jízdní odpory jsou síly, které působí proti pohybu vozidla. Dalšími jízdními odpory jsou valivý odpor, odpor

stoupání, odpor zrychlení a v případě jeho zapojení odpor přívěsu. Jejich součet je celkový jízdní odpor vozidla, který musí být překonán hnací silou [7]:

$$O_c = O_a + O_v + O_s + O_z + O_p = F_K \quad (2)$$

kde O_c je celkový jízdní odpor vozidla, O_a aerodynamický odpor, O_v valivý odpor, O_s odpor stoupání, O_z odpor zrychlení, O_p odpor přívěsu a F_K hnací síla vozidla.

Velikost aerodynamického odporu je dána výslednicí normálových tlaků vzduchu na povrch karoserie a třecích sil, které působí v tečném směru proudění vzduchu kolem karoserie. Dále je v celkovém vzdušném odporu zahrnutý rozdíl tlaků nad a pod vozidlem (nad vozidlem je podtlak, pod vozidlem mírný přetlak), odpory vznikající při průchodu vzduchu chladícím a větracím systémem a odpory vznikající vířením a třením vzduchu v okolí otáčejících se kol vozidla. [7]

$$\text{Celkový aerodynamický odpor vozidla: } O_a = C_x \frac{\rho}{2} S_x v_x^2 \quad (3)$$

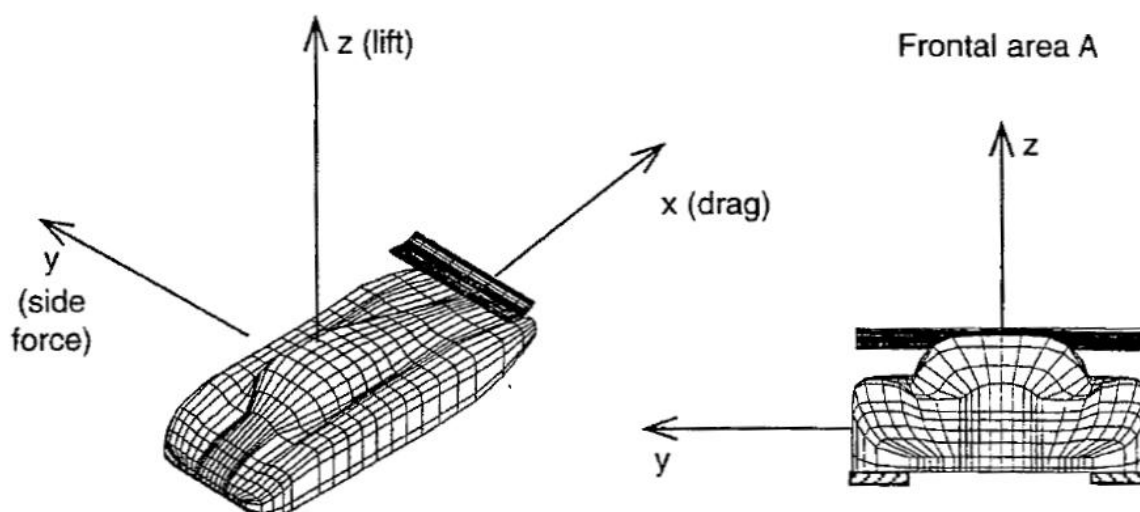
kde v_x je náporová rychlost proudění vzduchu ve směru osy x , S_x čelní plocha vozidla, ρ hustota vzduchu a C_x součinitel čelního aerodynamického odporu [7].

Čelní plochu vozidla lze získat jeho čelní projekcí na projekční stěnu nebo z výkresové dokumentace. [7]

$$\text{Přibližná hodnota čelní plochy vozidla: } S_{xp} = 0,84hw \quad (4)$$

kde h je výška vozidla a w jeho šířka.

Kromě aerodynamického odporu uvažujeme při vyšetřování pohybu vozidla v přímé jízdě z šesti aerodynamických silových a momentových účinků podél os souřadného systému pouze vztlak a klonivý moment. [7]



Obr. 5 Souřadný systém použitý k definování směrů sil působících na vozidlo a silových koeficientů [8]

Vztlak F_z (nebo F_l – lift) působí v kladném směru osy z (záporné hodnoty vztlaku znamenají přítlak). Kromě celkového vztlaku se zkoumá i vztlak zadní nápravy F_{zRear} (rear-axel lift), který je z inženýrského hlediska důležitější než celkový, protože je zodpovědný za ztrátu stability vozidla za velkých rychlostí při rovné jízdě [9].

$$\text{Aerodynamický vztlak vozidla: } F_z = C_z \frac{\rho}{2} S_x v_x^2 \quad (5)$$

kde C_z je součinitel aerodynamického vztlaku.

Klonivý moment M_Y je důležitý pro zjištění rozložení zatížení mezi přední a zadní nápravou. [10]

$$M_Y = C_{My} \frac{\rho}{2} S_x l v_x^2 \quad (6)$$

kde C_{My} je součinitel klonivého momentu a l rozvor [7].

V bočním směru působí boční síla F_y , která je podstatná při silném bočním větru nebo působení jiných vnějších bočních vlivů.

$$\text{Aerodynamická boční síla: } F_y = C_y \frac{\rho}{2} S_x v_x^2 \quad (7)$$

kde C_y je součinitel aerodynamické boční síly [10].

Všechny tyto veličiny počínaje celkovým aerodynamickým odporem O_a se získávají experimentálně v aerodynamickém tunelu. [7]

1.3 SOUČiniteLE AERODYNAMICKÉHO ODPORU, VZTLAKU A BOČNÍ SÍLY

Aerodynamický odpor roste s druhou mocninou relativní rychlosti. Abychom získali bezrozměrnou veličinu charakterizující tvar vozidla, vydělíme jej v_x^2 . Získáme tak hodnoty součinitelů nezávislé na rychlosti, ale pouze na tvaru vozidla [10]:

$$\text{Součinitel aerodynamického odporu: } C_x = \frac{2F_x}{\rho S_x v_x^2} \quad (8)$$

$$\text{Součinitel aerodynamického vztlaku: } C_z = \frac{2F_z}{\rho S_x v_x^2} \quad (9)$$

$$\text{Součinitel aerodynamické boční síly: } C_y = \frac{2F_y}{\rho S_x v_x^2} \quad (10)$$

kde F_x je aerodynamický odpor vozidla. Mimo Evropu je obvyklé značení součinitelů (ve stejném pořadí) C_D (drag), C_L (lift) a C_Y . [8]

Součinitel C_z je menší než C_x . Jeho velikost závisí silně na úhlu náběhu vzduchu. [7]

Ke globálnímu popisu aerodynamického odporu vozidla je třeba nejen koeficient C_D , ale i čelní plocha S_x . Na rozdíl od C_D se čelní plocha u vozů vyráběných v posledních letech zvětšuje z důvodu zvyšování bezpečnosti vozidla.

Tab. 1 Příklady hodnot součinitelů aerodynamického odporu a čelních ploch[11][12][13][14]

Typ vozidla	Rok výroby	Název vozidla	C_D [-]	S_x [m ²]
sedan	1985 – 1991	Subaru XT	0,30	1,83
	1996 – 2000	Honda Civic Sedan	0,32	1,99
hatchback	1994 – 2001	Škoda Felicia	0,35	1,94
	2010 – 2015	Toyota Prius	0,25	2,18
sportovní	1989 – 1997	Opel Calibra	0,26	1,93
	2003 – 2012	Mazda RX-8	0,30	2,00
	2012 – nyní	Tesla S	0,24	2,34
experimentální	1939	Schlörwagen	0,19	2,25
	2013	Volkswagen XL1	0,16	1,02
	1935 – 1938	Tatra T77a	0,21	2,23

2 TESTOVÁNÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Pokud chceme zjistit aerodynamické parametry zkoumaného vozidla, máme na výběr ze tří možností:

- Měření přímo na vozovce
- Měření v aerodynamickém tunelu
- Výpočetní simulace

Každá z nich má své výhody a nevýhody a žádná z nich není univerzální pro potřeby vývoje automobilu. Jestliže je to ve finančních možnostech firmy, je vhodné využít kombinaci více metod. Měření přímo na vozovce nelze využít při tvorbě prototypu, proto se jím dále nebude tato práce zabývat.

Požadovaná data z testování přitom jsou:

- Aerodynamické koeficienty (přítlak na nápravách, celkový odpor, vztlak)
- Rozložení tlaku po povrchu karoserie (pro optimalizaci tvaru vozidla)
- Vizualizace proudění (proudnice, místa odtrženého proudění, víry) [8]

2.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Aerodynamický tunel se používá k vyvolání umělého kontrolovaného proudění okolo měřeného vozidla. Někdy se z finančních důvodů používá zmenšený model v určitém poměru ke skutečnému vozu. Použití zmenšených modelů snižuje přesnost měření a při přepočítávání na skutečnou velikost vozidla je nutno zahrnout korekce.



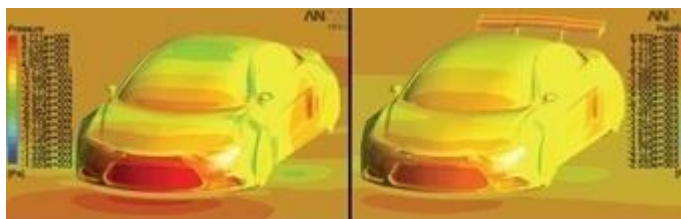
Obr. 6 Testovací sekce aerodynamického tunelu automobilky Volvo [15]

Při měření v aerodynamickém tunelu nastává problém se statickou podlahou vzhledem k proudícímu vzduchu a neotáčení kol. Tyto problémy se řeší sacími otvory v podlaze, pohyblivými pásy, symetrickým modelem a rotujícími válci pod koly. [16]

2.2 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Zkráceně CFD analýza je výpočetní technologie, která umožňuje sledovat dynamiku proudících částic a simulovat tak mimo jiné proudící tekutiny. Pomocí CFD programů lze vytvořit virtuální prototyp systému či procesu, sledovat jej a následně analyzovat odezvu chování na různé podněty. Používá se jak ve vývojových studiích, tak v případech, kde není možné nebo ekonomické provést měření experimentálně. Se zvyšující se výpočetní kapacitou se rozšiřuje využití CFD simulací. [17][18][19]

Mezi nejznámější a nejvíce používané CFD programy patří Fluent a CFX od společnosti ANSYS, scSTREAM a SC/Tetra od Cradle CFD a STAR-CCM+ od CD-adapco. [17]



Obr. 7 Grafické znázornění analýzy rozložení tlaku na povrchu vozidla v programu ANSYS CFX [20]

3 PASIVNÍ PRVKY SNIŽOVÁNÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

Pasivní prvky pro ovládání proudění okolo vozidla za cílem snížení aerodynamického odporu zahrnují geometrické modifikace karoserie a přídavné prvky jako vírové generátory pro separaci proudu vzduchu. Pasivní prvky jsou nepohyblivé – jsou tak vždy v provozu, bez ohledu na jejich potřebu. Na rozdíl od aktivních nevyžadují žádný pohon. [21]

Dále budou uvedeny jednotlivé pasivní prvky rozdělené podle umístění na automobilu. Nejdříve budou vždy uvedeny prvky používané v sériové výrobě, poté případně prvky nasazované na výzkumných vozech.

3.1 PŘEDNÍ ČÁST AUTOMOBILU

Na přední část karoserie působí při jízdě vysoký tlak a vzduch se zde rozděluje na proudy okolo karoserie a do chladiče. V aerodynamické optimalizaci tak jde o řízení žádoucí distribuce těchto proudů vzduchu.

Pasivních prvků se na přední části automobilu nepoužívá mnoho. Obecně mají za cíl především zvýšit přítlak přední nápravy a už méně snižují aerodynamický odpor. Uvedené prvky se na sériově vyráběných vozech objevují z přídavných aerodynamických balíků nebo v rámci vzhledově-tuningových úprav. Jsou vyráběny z odolných a zároveň lehkých materiálů, nejčastěji z kompozitu uhlíkových vláken CFRP nebo z plastové hmoty jako polyuretan. [22]

3.1.1 PŘEDNÍ SPOILER

Přední spoiler má z názvu vyplývající funkci přerušení proudění vzduchu pod vozidlo, které zvyšuje jeho odpor a snižuje přítlak. Skládá se ze dvou částí:

Přední **air dam** je vzduchová přehrada na předním nárazníku, která omezuje proud vzduchu tak, že jej rozdělí do stran. Pod vozidlem je tím pádem nižší tlak a tedy větší rychlost vzduchu. To způsobí zvýšení přítlaku a snížení odporu.



Obr. 1 Air dam automobilu Ford Fusion 2013[23]

Aby byl dosažen ještě větší efekt snížení aerodynamického odporu a zvýšení přítlaku, připojuje se pod air dam ještě relativně tenká vodorovná lišta, přední **splitter**. Ten vytváří přesnější linii oddělení proudů pod vozidlo a okolo něj. [24]



Obr. 2 Přední splitter jako součást Aero Kitu Mazdy 3[25]

3.1.2 CANARDS

Před předními koly se z boků karoserie umísťuje po jedné až dvou malých vzestupných lištách, nazývaných bumper canards nebo dive planes. Proud vzduchu je po canardu odchýlen vzhůru a dále do řízeného víru podél vozidla. Zvýší se tak přítlak a sníží odpor, ale tak málo, že jde spíše o vzhledový prvek. [26]



Obr. 3 Canard na předním nárazníku BMW M4 s příplatkovou sadou M Performance[27]

3.2 ZADNÍ ČÁST AUTOMOBILU

Za zadní částí karoserie vzniká za jízdy úplav, oblast nízkých tlaků a rychlostí odtrženého turbulentního proudění tvořící značný aerodynamický odpor. Snahou aerodynamické optimalizace je úplav redukovat a tak odpor snížit. Toho se s použitím pasivních aerodynamických prvků dosahuje zmenšením zadní stěny automobilu a řízením odtržení proudění, což zároveň zvýší tlak na zadní stěnu.

3.2.1 ZADNÍ SPOILER

Při proudění vzduchu okolo zaoblených zadních hran karoserie se proměnlivě mění linie odtržení proudění. Tento fenomén řeší zadní spoiler, který tvarem navazuje na karoserii a svou náhlou změnou geometrie pomáhá odtržení proudění, čímž snižuje odpor.

Zadní spoiler je prakticky nejčastěji aplikovaným pasivním aerodynamickým prvkem na vozech vyráběných v posledních letech. U automobilů s tvarem karoserie Hatchback, Kombi, Crossover, MPV a SUV se používá zadní spoiler za střešní hranou. Bývá buď výraznější, jako na obrázku, nebo je zastoupen alespoň ostrou hranou karoserie. U karoserií Liftback, Sedan a Kupé se používá zadní spoiler na hraně pátých dveří, který je opět buď samostatným prvkem, nebo alespoň hranou karoserie.



Obr. 5 Zadní spoiler za střešní hranou vozu Škoda Fabia III Monte Carlo[28]



Obr. 4 Zadní spoiler na hraně pátých dveří vozu Opel Astra 2013 sedan[29]

Zadní spoiler je často mylně zaměňován se **zadním křídlem**, které má profil obráceného leteckého křídla, je umístěno ve vertikálním odsazení od pátých dveří, vytváří přtlak na zadní nápravě a odpor naopak zvyšuje.

Podle studie na Volvu XC60 má prodloužení střešního spoileru o 20 cm vliv na snížení aerodynamického odporu pouze $\Delta C_D = -0,005$. Snižuje však velikost úplavu zpožděným odtržením mezní vrstvy, která je skloněna níž. Takto dlouhý spoiler ale není příliš estetický a zmenšuje zornou plochu zadního okna.[30]

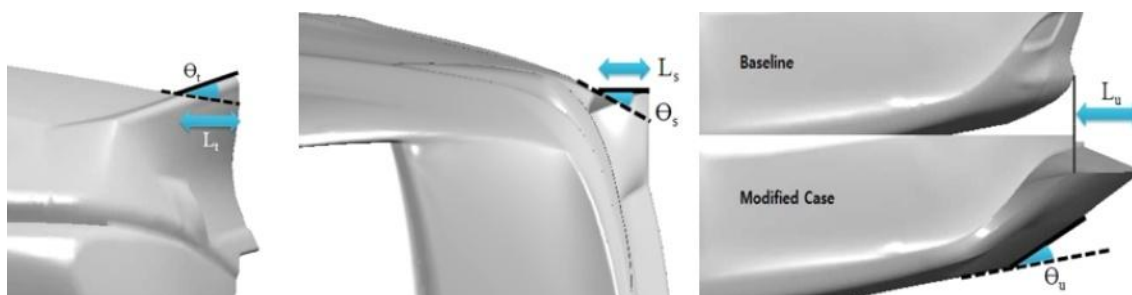
3.2.2 OPTIMALIZACE ZADNÍ ČÁSTI SEDANU

V roce 2011 proběhla simulační studie vlivu tvaru zadní části sedanu na jeho aerodynamický odpor. Jako základní tvar pro optimalizaci zastupující automobilové sedany byl použit sedan Hyundai YF Sonata. Cílem studie bylo najít tvar zadní části karoserie s co nejnižším C_D a zároveň nižším C_L než původním.[31]

K modifikaci byly vybrány 3 části zadní karoserie, a to kufr, zadní boky a zadní podvozek, přičemž jako proměnné vystupovaly délka a úhel jednotlivých částí. Studie použila CFD analýzu s výchozím modelem YF Sonaty ověřeným experimentálně ve větrném tunelu a hodnotou $C_D = 0,266$. Za podmínky CFD analýzy byly zvoleny rychlost vtékání vzduchu a rychlost pohybující se vozovky 100km/h a odpovídající úhlová rychlost otáčení kol.

Analýza charakteristiky nestabilního proudění ukázala, že zatímco tlak na přední části vozidla se mění jen mírně, na zadní části vznikají velké fluktuace tlaku. Tím potvrdila, že tvar zadní části sedanu ovlivňuje aerodynamický odpor mnohem více než tvar přední části.

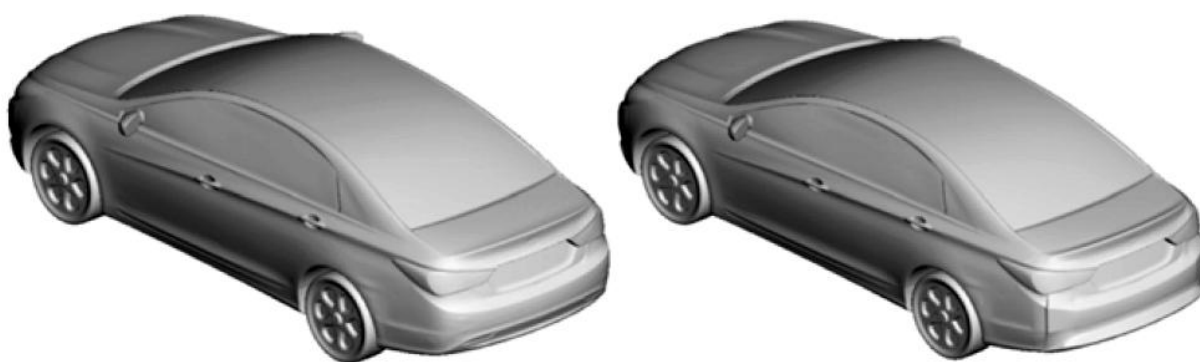
Zadní boky a kufrová část jsou ovlivňovány především vírem od C-sloupku (zadního) a Coandovým efektem (tendencí proudu přilnout na přilehlý povrch[32]), které tvoří indukovaný odpor. Modifikovaná délka a úhel těchto částí tak byla optimalizována na snížení těchto vlivů. Zadní podvozek působí s vozovkou jako difuzor, tím pádem byl jeho proměnnou délkou a úhlem regulován efekt difuzoru.



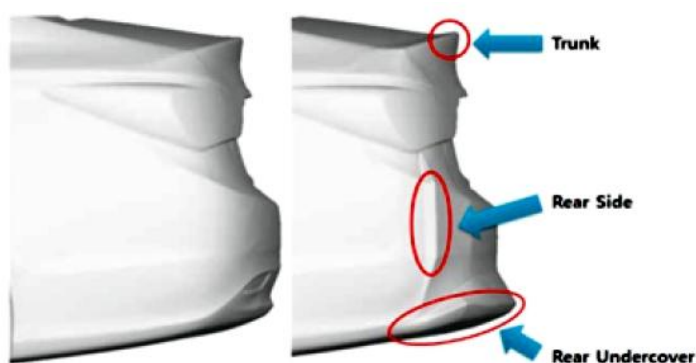
Obr. 6 Modifikované délky a úhly jednotlivých částí karoserie sedanu (zleva hrana kufru, boční části zadní karoserie a zadní podvozek)[31]

S použitím D-optimalní DOE metodologie (optimalizační metodologie maximálního determinantu) bylo vygenerováno 64 různých tvarů zadní části karoserie YF Sonaty. Každý tvar byl vyhodnocen CFD analýzou a byl vytvořen ANN model (model umělé neuronové sítě). C_D bylo pro jednotlivé tvary v rozmezí 0,257 a 0,278.

Byl vybrán finální tvar s $C_D = 0,251$, což je o 5,64% nižší než hodnota výchozího modelu. Navíc optimalizovaná předpověď a výsledek CFD z přepracovaného modelu YF Sonaty byly téměř totožné, což naznačuje, že optimalizace byla přesná.



Obr. 8 Porovnání původního modelu (vlevo) a modifikované verze YF Sonaty (vpravo)[31]



Obr. 7 Optimalizace zadní části z bočního pohledu[31]

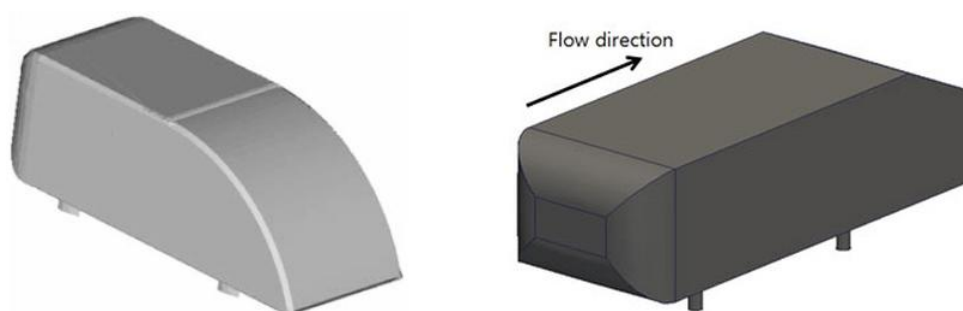
3.2.3 VÝZKUM VÍROVÝCH GENERÁTORŮ

Vírové generátory (vortex generators) jsou tvarové prvky umísťované v řadě na zadní hranu střechy automobilu, většinou spojené podložkou. Jejich funkce spočívá v řízeném odtržení proudění. Nejde o sériově nasazovanou součást, lze ji však nalézt na některých vozech jako doplňky, například na sérii Mitsubishi Lancer Evolution nebo na Subaru WRX STI.[33][34]



Obr. 9 Vírové generátory Rexpeed na Mitsubishi Lancer Evolution 2015 (Evo X)[34]

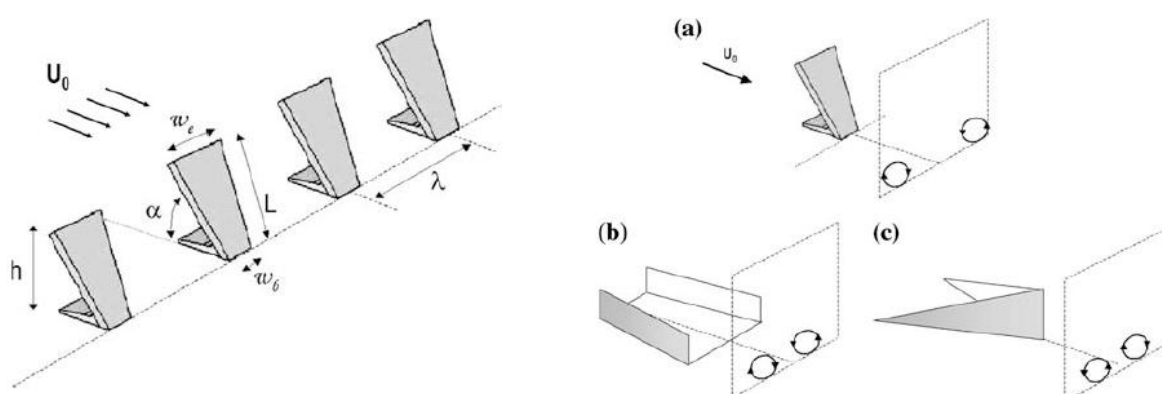
Vlivem vírových generátorů na aerodynamické koeficienty se roku 2009 zabývala studie, ve které měly vírové generátory nekonvenční lichoběžníkový tvar a stavitelnou polohu. Byly umístěny na zadní části 3D bluff-body (špatně obtékaného tělesa) o rozměrech 290x340x900 mm, modifikovaného Ahmed body se zaoblenou zadní hranou místo sražené, tím pádem nebylo místo odtržení proudění definováno geometrií tělesa.[35]



Obr. 10 Porovnání tvaru 3D bluff-body (vlevo) a Ahmed body (vpravo)[35][36]

Testy modelu proběhly v aerodynamickém tunelu se zvýšenou podlahou při rychlostech obtékání 20 až 40 ms^{-1} . Rychlostní pole kolem modelu byla měřena pomocí PIV (měření rychlostního obrazu částic) v několika rovinách, z čehož bylo možné rozpoznat 3D struktury proudění.

Vírový generátor trapézového tvaru vytváří dvojici navzájem opačně rotujících vírů, čehož se u jiných vírových generátorů dosahuje s použitím dvou wingletů. Pro účely studie bylo možné vírové generátory naklápět pomocí dálkově ovládaného krokového motoru.



Obr. 11 Vlevo tvary a geometrické parametry vírových generátorů při sklopení 60° , vpravo porovnání vírových generátorů použitých v této studii a jednoduchých wingletů použitých v jiných studiích.[35]

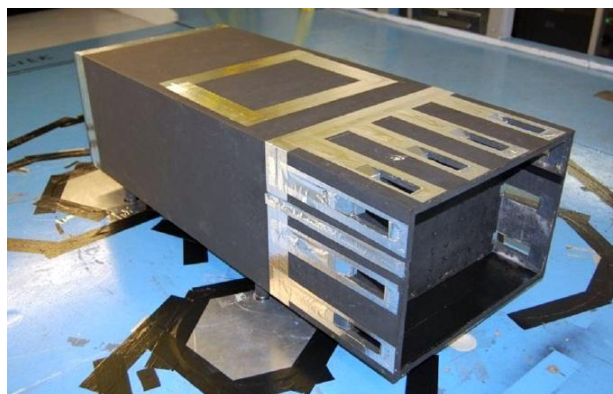
Byla demonstrována vysoká citlivost na geometrické (úhel mezi vírovými generátory a tělesem, mezery mezi generátory a jejich podélné umístění na zaoblené ploše) a fyzikální parametry (rychlost proudění). Maximální snížení aerodynamického odporu bylo dosaženo o -12% , přičemž snížení vztlaku bylo dosaženo přes -60% se silnou závislostí na rychlosti proudění. Pro některá nastavení dokonce došlo na zadní nápravě k invertování vztlaku na přítlak (až -104%). Ukázalo se, že tato snížení jsou spojena se zvětšením recirkulační bubliny za zadní hranou.

Studie ukazuje, že pro špatně obtékaná tělesa s nízkým poměrem stran, jako silniční vozidla, je strategie snižování aerodynamického odporu odlišná od té na profilech leteckého křídla: brzká separace mezní vrstvy vede k výraznému snížení aerodynamického odporu, pokud je snížena cirkulace ulpívajících vírů.

3.2.4 VÝZKUM ZADNÍHO KANÁLU A ZADNÍ PROHLUBNĚ

Mezi neobvyklé prvky mající za cíl zmenšit útlav a zvýšit tlak na zadní stěně automobilu se řadí zadní kanál (base bleed) a zadní prohlubeň (base cavity nebo rear cavity).

Zadní kanál funguje na principu propouštění vzduchu z bočních částí karoserie za zadní stěnu. Byla provedena studie na tvaru Ahmed body, která použila podélné oválné šterbiny na bocích a horní zadní části ústící do zadní prohlubně. Maximální snížení odporu bylo dosaženo pouze $\Delta C_D = -0,03$ pro poměr délky drážek šterbin ku charakteristickému průměru tvaru 0,37.[37]



Obr. 12 Ahmed body s kanály ústícími do zadní prohlubně[37]

Zadní kanály jsou nasazovány zatím výhradně u závodních vozů a zadní prohlubně nejsou kvůli prodlužování vozidla a neestetičnosti používány vůbec.

3.3 PODVOZEK

Čím více proudí vzduchu pod podvozek (převážně v přední části), tím nižší je přítlak vozidla a vyšší odpor. Spolu s prvky přední masky slouží prvky podvozku k redukci tohoto proudění, čímž se sníží jeho tlak a zvýší rychlost. Obecně toho lze dosáhnout snížením podvozku, dále pak jeho zploštěním a zakrytím částečnými nebo celopodvozkovými kryty. Při aplikaci krytu podvozku nastává problém s nutnou demontáží při opravách.



Obr. 13 Podvozkový kryt vozu Honda S2000[38]

K redukci proudění vzduchu pod boky podvozku a tak ke zvýšení přítlaku slouží prahové spoilery (side skirts). V některých případech obsahují prahové spoilery otvory, které distribuují vzduch z nebo do prostoru kol.



Obr. 14 Prahové spoilery vozu Aston Martin V8 Vantage S[39]

3.4 SNÍŽENÍ ODPORU V PROSTORU KOL

Prostor kol se podílí ze čtvrtiny na celkovém aerodynamickém odporu vozidla. [40] Dochází zde k tvorbě vírů v důsledku rotace kol a interakce s okolo proudícím vzduchem. Snižování odporu v tomto prostoru spočívá v řízené distribuci vzduchu nebo dokonce v bočním zakrytí kolového prostoru.

Proudění vzduchu ke kolům ale není vhodné příliš omezovat, protože je potřeba zajistit dostatečné chlazení brzd. Distribuce vzduchu se zajišťuje vhodně tvarovanými disky, drážkami v podběhu a skrz boční mřížky nárazníku. Zmenšením mezery v okolí kola je možné výrazně snížit aerodynamický odpor kola, opět je ale potřeba zachovat funkčnost, v tomto případě zajistit dostatečný prostor pro vertikální pohyb kola při pružení. [41]

Zakrytí prostoru kol sice přináší aerodynamické zlepšení (u první generace hybridu Honda Insight bylo dosaženo celkového $C_D = 0,25$), ale vytváří neoblíbený design a přináší komplikace při pumpování a výměnách kol.[42]



Obr. 15 Zakrytá zadní kola Hondy Insight první generace[43]

4 AKTIVNÍ PRVKY SNIŽOVÁNÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

Aktivní prvky pro ovládání proudění okolo vozidla za cílem snížení aerodynamického odporu oproti pasivním vyžadují pro regulaci přídavnou energii nebo moment. Mohou ale být podle aktuální potřeby aktivovány nebo deaktivovány, případně proměnně řízeny podle zvoleného aerodynamického režimu. Na pohony aktivních prvků jsou kladeny vysoké nároky, týkající se mimo jiné malých rozměrů, nízké váhy, energetické účinnosti, odolnosti a rychlé odezvy. [21]

4.1 AERODYNAMICKÉ REŽIMY AUT

Vzhledem k významu aerodynamiky až při vyšších rychlostech jsou pro použití aktivní aerodynamiky ve vozech zavedeny volitelné nebo automatické aerodynamické režimy. Například u vozů Toyota Supra A80 a Porsche 911 Turbo S je tak snížením polohy předního spoileru dosaženo při vyšších rychlostech zvýšení přítlaču a snížení odporu.



Obr. 16 Toyota Supra A80 s aktivním předním spoilerem[44]

4.2 AERODYNAMICKÁ BRZDA

Zajímavým využitím aktivní aerodynamiky je stavitelný zadní spoiler. Nejde však o prvek pro snižování odporu, ale naopak vhodným naklopením spoileru se odpor požadovaně zvýší, což zbrzdí vozidlo.

Jde o často používaný prvek u dražších sportovních vozů posledních let, jako Bugatti Veyron 16.4 Supersport, McLaren MP4-12C, Mercedes-Benz SLS AMG-GT, BMW 3 Grand Turismo a Peugeot RCZ.[45]



Obr. 17 Aktivní zadní spoiler Bugatti Veyronu 16.4 Super Sport[45]

4.3 AKTIVNÍ LAMELY MASKY CHLADIČE

Průchod vzduchu do motorového prostoru působí aerodynamický odpor, přičemž se mění potřeba množství vzduchu na chlazení. Pro zlepšení aerodynamiky při zachování dostatečného chlazení jsou proto aplikovány aktivní lamely (žaluzie, mřížka). Pokud nepřekročí teplota chladicí kapaliny kritickou teplotu, jsou lamely uzavřené; po jejím překročení se otevřou.

Aktivní lamely masky chladiče jsou u nových vozů nasazovány v sériové výrobě v rámci příplatkových sad. Najdeme je například v aerodynamickém paketu Škody Octavie 2017 1.0 TSI nebo u Fordu Focus 3. generace, u kterého se při vyšších rychlostech díky zlepšení aerodynamiky aktivní mřížkou sníží spotřeba v cyklu NEDC o 0,8%. [46]



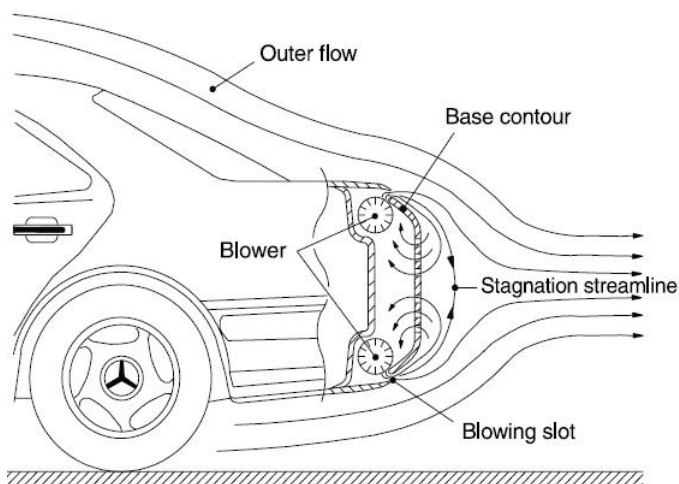
Obr. 18 Vnitřní pohled na aktivní mřížku chladiče Fordu Focus III[46]

4.4 VÝZKUM AKTIVNÍ STABILIZACE ÚPLAVU

Úplav, v literatuře také označovaný jako mrtvá voda, je kvůli svému podílu na aerodynamickém odporu vozidel klíčovou oblastí i pro aplikaci aktivních aerodynamických prvků. Proběhla řada studií, které navrhují různá zařízení, sloužící ke zvyšování tlaku na zadní stěnu vozidla, redukci velikosti úplavu a jeho stabilizaci, čímž dosahují snížení celkového odporu.

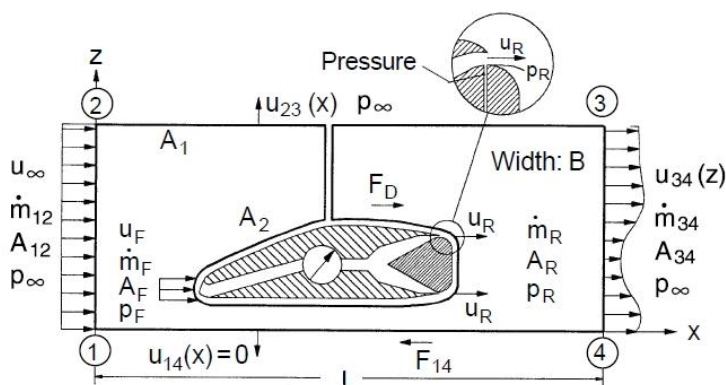
4.4.1 VYUŽITÍ COANDOVA EFEKTU

Mezi starší návrhy aktivní aerodynamiky patří umístění zařízení s tangenciálním dmychadlem na zadní části karoserie. Z úplavu je do dmychadla nasáván mřížkou v zadním nárazníku vzduch, a rychlostí až 50 ms^{-1} je foukán štěrbinami v horní a dolní zadní hraně rovnoběžně s povrchem. Díky Coandově efektu okolní proudění přilne na proud generovaný dmychadlem a více tak kopíruje tvar karoserie, čímž se zmenší velikost úplavu a sníží aerodynamický odpor.[47]



Obr. 19 Zařízení s tangenciálním dmychadlem využívající Coandův efekt k redukci úplavu[48]

Ověření požadované funkce zařízení bylo podrobena studii. V ní byla navržena změna; místo přímo z úplavu byl vzduch nasáván z přední části vozidla a uvnitř něj urychlován. Zanedbání vlivu vírů C-sloupků dalo vzniknout modelu, dvourozměrně reprezentujícím vozidlo.[48]

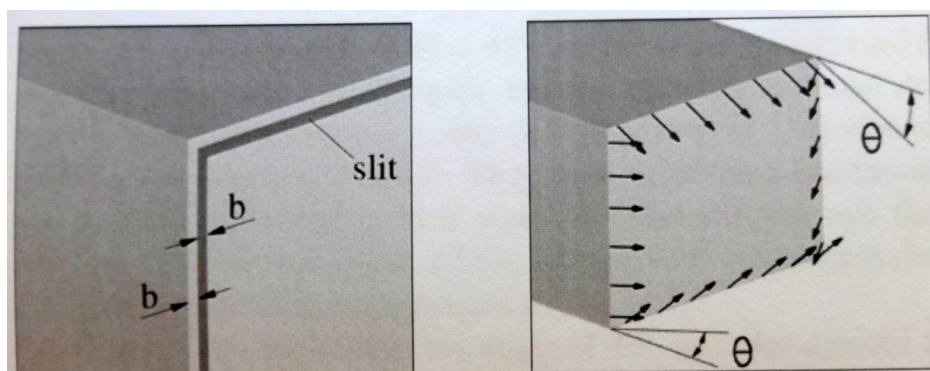


Obr. 20 Model se zařízením pro aktivní redukci úplavu[48]

Měřením ve větrném tunelu s pohyblivým pásem bylo v porovnání s modelem bez zařízení zjištěno 50% zvýšení tlaku na zadní část a 10% snížení C_D . Dále byla zjištěna silná závislost odporu a vztahu na Reynoldsově čísla a zmenšení úplavu. Urychlené proudy vzduchu tangenciálně vypouštěné ze zadních hran přilehly na zadní část karoserie, a na ně přilehlo okolní proudění. Tím se zamezilo vzniku recirkulační bubliny za modelem. Obě podoby zařízení však nejsou pro aplikaci v sériové výrobě kvůli svým rozměrům použitelné.

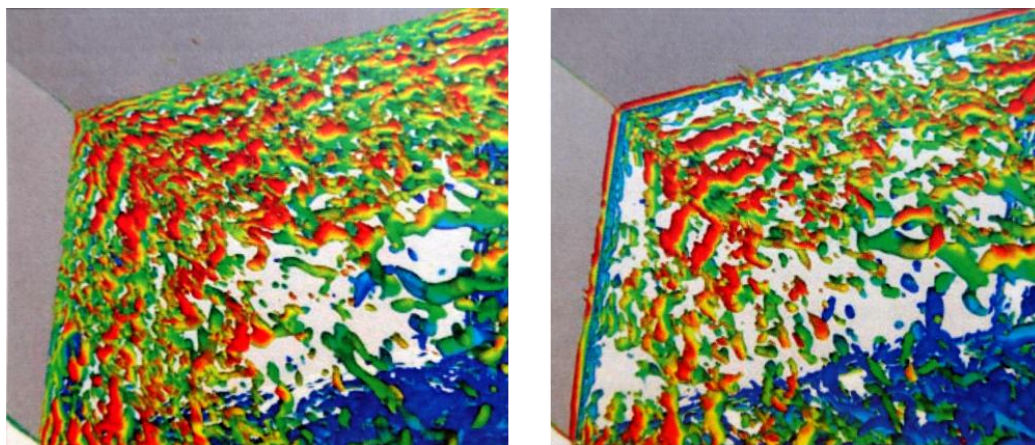
4.4.2 STABILNÍ FOUKÁNÍ PODÉL ZADNÍCH HRAN

Roku 2010 proběhla studie zkoumající pomocí LES simulací vliv stabilního foukání malou štěrbinou lemující zadní hrany Ahmed body se čtvercovou zádí na aerodynamický odpor. Byly zkoumány jednotlivé úhly foukání, přičemž maximálního snížení odporu o 11,1% bylo dosaženo pro úhel 45° . Snížení odporu bylo způsobeno zvýšením tlaku na povrchu zadní části vozidla. Dále byla zjištěna stabilizace úplavu foukáním.[49]



Obr. 21 Štěrbinu lemující zadní hrany Ahmed body se čtvercovou zádí a volené parametry: šířka štěrbiny a úhel foukání [49]

Simulace proběhla i pro modifikovanou variantu štěrbin s vynecháním částí v blízkosti rohů zádě. Tato malá změna způsobila významné zhoršení redukčního efektu a poukázala tak na význam aerodynamiky rohů vozidla.

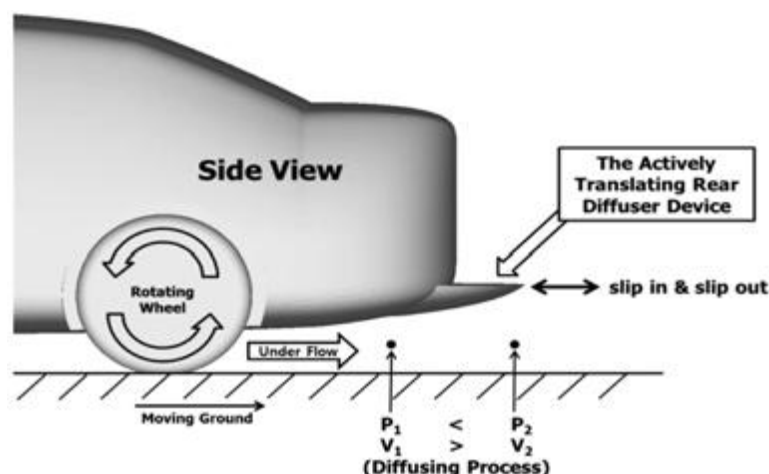


Obr. 22 Lokální rychlosti ve vírech smykové vrstvy v úplavu modelu vozidla. Vlevo pro původní model, vpravo pro foukání pod úhlem 45° [49]

Odhad účinnosti aktivní kontroly foukáním štěrbinou ukázal, že i přes její dobrou efektivitu je energie potřebná k jejímu fungování vyšší, než energetická úspora z redukce celkového odporu.

4.4.3 VÝSUVNÝ ZADNÍ DIFUZOR

Roku 2011 proběhla studie aktivního zařízení výsuvného zadního difuzoru. Zařízení obloukového tvaru při nižších rychlostech kopíruje tvar zadního nárazníku, ale při vyšších rychlostech se vysune a zvýší tak tlak na zadní stěnu vozidla. Výsuvný difuzor pak brání nízkotlakému vzduchu proudícímu zpod podvozku ve stoupání po zadní stěně vozidla, a zároveň snížením rychlosti tohoto proudu zvýší jeho tlak a tím sníží aerodynamický odpor vozidla.[50]



Obr. 23 Zadní výsuvný aktivní difuzor[50]

Zařízení bylo zkoumáno CFD simulací při podmínkách otáčejících se kol a pohybující vozovky. Byl zjištěn optimální výsun difuzoru, pro nějž bylo dosaženo snížení odporu přes 4%, což při rychlostech přes 70 km/h znamená snížení spotřeby přibližně o 2%.

Výsuvný difuzor by však mohl u osobních automobilů znamenat estetický, bezpečnostní i legislativní problém, navíc by jeho aplikace způsobila zmenšení zavazadlového prostoru.

ZÁVĚR

Snižování aerodynamického odporu přináší u osobních automobilů snižování spotřeby, aerodynamické prvky přesto kvůli prodejnosti vozidel ustupují jejich designovému provedení.

Vliv aerodynamické optimalizace je podstatný až při vyšších rychlostech, proto se v posledních letech u dražších vozů používají aktivní aerodynamické prvky.

Na aerodynamický odpor vozidla má největší vliv tvar zadní části karoserie (30%), kde se umísťuje nejvíce aerodynamických prvků a je předmětem většiny studií aerodynamické optimalizace. Zadní spoiler je nejčastěji užívaným aerodynamickým prvkem a je často mylně zaměňován se zadním křídlem. Příliš nezáleží na jeho délce; studie na Volvu XC60 zjistila při jeho prodloužení $\Delta C_D = -0,005$. Aktivní zadní spoiler je řízeným zvyšováním odporu využíván u sportovních vozů jako aerodynamická brzda. Vírové generátory jsou v sériové výrobě užívány řídce, ve studii snížily odpor 3D bluff-body o -12% . Optimalizací zadní části sedanu Hyundai YF Sonata bylo dosaženo snížení odporu o $5,64\%$. Zadní kanály jsou umísťovány jen na závodních vozech, zadní prohlubně nejsou aplikovány vůbec, ale jejich kombinací dospěla studie k redukci odporu $\Delta C_D = -0,03$. Aktivním zmenšením úplavu s využitím Coandova efektu bylo dosaženo snížení odporu o 10% . Stabilním foukáním podél zadních hran byl odpor snížen o $11,1\%$, avšak spotřeba energie na foukání převyšuje jeho energetický benefit. Aktivním výsuvným zadním difuzorem bylo dosaženo snížení odporu přes 4% .

Tvar přední části karoserie nemá na aerodynamiku vozidla výrazný vliv, ale zajišťuje distribuci proudů vzduchu. Umísťují se zde přední spoiler (složený ze splitteru a air dam, u sportovních vozů se aktivně snižuje) a boční canards. Aktivními lamelami masky chladiče bylo u Fordu Fusion 3. generace dosaženo snížení spotřeby v cyklu NEDC o $0,8\%$.

Podvozek se podílí z 25% na celkovém aerodynamickém odporu vozidla. Zde se odpor redukuje snížením podvozku, jeho zakrytováním a prahovými spoilery. Snížení podvozku však není praktické při nerovnostech vozovky a kryty podvozku přináší komplikace při opravách.

Prostor kol má na celkovém aerodynamickém odporu vozidla podíl také 25% . Odpor se zde snižuje vhodně tvarovanými disky, zmenšením mezery v okolí kol nebo zakrytováním. Zakrytování kol se z důvodu nepopulárního vzhledu užívá jen zřídka, a přináší komplikace s obsluhou. Při redukci odporu je zde nutné zachovat dostatečný přívod vzduchu na chlazení brzd.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Comparison of velocity profiles in a pipe for laminar and turbulent flows. In: *NPTEL: National Programme on Technology Enhanced Learning* [online]. Chennai: BodhBridge, 2009 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.nptel.ac.in/courses/105104098/fluid_final/lecture-32/images/fig_10.2a.jpg
- [2] Smoke and Tuft Flow Visualization. *Glenn Research Center / NASA* [online]. Cleveland (Ohio): National Aeronautics and Space Administration, 2016 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvsmoke.html>
- [3] F-17 HARV smoke and tuft visualization at 20 degree angle of attack: NASA Image eXchange Collection. In: *NASA Images* [online]. Los Angeles: Luna Imaging, 2015 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://nasamedia.lunaimaging.com/MediaManager/srvr?mediafile=/Size4/nasaNAS-2-NA/4008/EC89-0096-206.jpg>
- [4] EnSight post processing of external aerodynamic simulation of a rally car. In: *SmugMug* [online]. Mountain View: MacAskill, c2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://gallery.ensight.com/keyword/streamlines/>
- [5] DUFEK, T. Mechanika tekutin: Zápisky z 10. přednášky. In: *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň: UWB, c1991-2016 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~uruba/MT/koment/MT_10k.pdf
- [6] Profile of a boundary layer.: NASA EP-89, 1971, p. 68. In: *National Aeronautics and Space Administration: History Program* [online]. Washington, DC: NASA, 2016 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://history.nasa.gov/SP-4103/p529.jpg>
- [7] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: VLK, 2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [8] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge (Massachusetts): Bentley Publishers, 2006. ISBN 0-8376-0142-8.
- [9] AIDER, J. L., J. F. BEAUDOIN a J. E. WESFREID. *Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators*. Experiments in Fluids [online]. **2010**, vol. 48, issue 5, s. 771-789 [cit. 2016-10-17]. DOI: 10.1007/s00348-009-0770-y. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00348-009-0770-y>
- [10] DANIEL, P. *Analýza vlivu polohy karoserie závodního vozu na aerodynamické charakteristiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.
- [11] TSUKADA, T., J. SAKAGAMI, Y. ARAI a H. TAKAHARA. *Aerodynamic Characteristics of Subaru XT* [online]. [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.4271/860216. Dostupné z: <http://papers.sae.org/860216/>.
- [12] Vehicle Coefficient of Drag List. *Ecomodder: Fuel Economy, Hypermiling, EcoModding News and Forum* [online]. vBulletin, c2000-2017 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://ecomodder.com/wiki/index.php/Vehicle_Coefficient_of_Drag_List

- [13] *Tatra T77a: designed by Hans Ledwinka, Erich Uberlacker and Paul Jaray* [online]. Mitchell, c1996-2008 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://tatra77.com/>
- [14] JÖRG, M. MB-Exotenforum - Sonderkarossen/Umbauten/Tuning: 170V und 170H einmal ganz anders. In: *NAST-Sonderfahrzeuge* [online]. Edemissen: Nast, c2002-2013 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.nast-sonderfahrzeuge.de/MB-Exotenforum/forum_entry.php?id=25942
- [15] The Volvo Cars Wind Tunnel: Test of a Volvo C30. In: *Volvo Car Group: Global Newsroom* [online]. Gothenburg: Volvo Car Corporation, c2017 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: https://www.media.volvocars.com/image/low/17020/1_1/5?i=1
- [16] HROMADA, M. *Aerodynamické tunely v oblasti automobilního průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura. Podle: KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge (Massachusetts): Bentley Publishers, 2006. ISBN 0-8376-0142-8.
- [17] DANIEL, P. *Analýza vlivu polohy karoserie závodního vozu na aerodynamické charakteristiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura. Podle: CFD [online]. [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/CFD/?q=node/11>
- [18] SOUČKOVÁ, N., P. KOLÁŘ a A. TUČEK. Simulace proudění tekutin pomocí CFD. *CAD* [online]. Webservis, c2009-2017, **2012** [cit. 2017-04-22]. ISSN 1802-6168. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>
- [19] MAFI, M. *Investigation of Turbulence Created by Formula One™ Cars with the Aid of Numerical Fluid Dynamics and Optimization of Overtaking Potential* [online]. ANSYS Conference & 25th CADFEM Users' Meeting: Congress Center Dresden, Germany, 2007, 10s. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267563397_Investigation_of_Turbulence_Created_by_Formula_One_Cars_with_the_Aid_of_Numerical_Fluid_Dynamics_and_Optimization_of_Overtaking_Potential
- [20] DAMJANOVIĆ, D., D. KOZAK, M. ZIVIĆ, Z. IVANDIĆ a T. BASKARIĆ. *CFD analysis of concept car in order to improve aerodynamics* [online]. International Scientific and Expert Conference TEAM 2010, Kecskemot, **2010**, 8s. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://jovojarmuve.hu/content/imageup/cikk_pdf/57b52378ca648b24f6f995801b966203.pdf
- [21] Aerodynamic Flow Control. *Aerospace Research Center* [online]. Columbus (Ohio): The Ohio State University, c2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://arc.osu.edu/research/aerodynamic-flow-control>
- [22] Aerodynamics and body kits for BMW F26 X4. In: *3DDesign: Individuality to your BMW* [online]. Tokyo: 3DDesign Corporation, 2012 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: http://www.3ddesign.jp/english/product_aero_F26X4.htm
- [23] 2013 3dCarbon Ford Fusion. In: *Automobiles Review* [online]. Sofia: BGO Media Network, c2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z:

- <http://www.automobilesreview.com/gallery/3dcarbon-ford-fusion/3dcarbon-ford-fusion-03.jpg>
- [24] S2000 Aerodynamics. In: *Rob Robinette: Car and Tube Amp Website* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://rob-robinette.com/S2000Aerodynamics.htm>
- [25] Aero Kit ... Mazda 3 2014/2015/2016. In: *Mazda Shop* [online]. Toronto: Scarboro Mazda, c2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://mazdashop.ca/products/aero-kit-gloss-black-full-mazda-3-2014-2015-2016>.
- [26] Canards and vortex generators. *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/canards.html>
- [27] Canards... In: *Car Throttle* [online]. London [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://static.carthrottle.com/workspace/uploads/posts/2015/08/image140-55bee91253d57.jpg>
- [28] Škoda Fabia Monte Carlo. In: *AutoTips: Automobilový magazín* [online]. tagDiv, 2016 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: http://www.autotips.cz/wp-content/uploads/2016/11/%C5%A0koda-Fabia-Monte-Carlo_2.jpg
- [29] Opel Astra sedan 2013. In: *CarAdvice* [online]. CarAdvice.com, c2006-2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://images.caradvice.com.au/thumb/1366/683/wp-content/uploads/2012/06/opel-astra-sedan-1-e1339022195864.jpg>
- [30] STREKEN, L. Analysis of the Base Wake on Passenger Vehicles. *Thesis for the degree of Licentiate of Engineering* [online]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2013, **2013**(14), 56 [cit. 2017-05-12]. ISSN 1652-8565. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/176766/176766.pdf>
- [31] SONG, K. S., S. O. KANG, S. O. JUN, H. I. PARK, J. D. KEE, K. H. KIM a D. H. LEE. Aerodynamic design optimization of rear body shapes of a sedan for drag reduction. *International Journal of Automotive Technology* [online]. c2012, **13**(6), 905-914 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1007/s12239-012-0091-7. ISSN 1229-9138. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12239-012-0091-7>
- [32] TRITTON, D. J. *Physical Fluid Dynamics*. 2 vyd. Oxford: Biddles, 1988, 519 s. ISBN 978-0-19-854493-7.
- [33] Subaru SPT Vortex Generator 2015+ WRX/STI. In: *Subaru WRX and STI Performance Parts...* [online]. Sterling (Virginia): Mach V Motorsports, c2017 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <https://www.fastwrx.com/products/vortex-generator-2015-wrx-sti>
- [34] PEREZ, R. EVO-X Rexpeed Carbon Fiber Vortex Generators. In: *EVO-X Tuning: Mitsubishi EVO Performance Parts and Upgrades* [online]. Sacramento: Style, c2009-2015 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.evotuning.com/images/feeder_images/cover_evo_robert_perez_rexpeed.jpg
- [35] AIDER, J-L., J-F. BEAUDOIN a J. E. WESFREID. Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. *Experiments in Fluids* [online]. 2010, **48**(5),

- 771-789 [cit. 2017-05-04]. DOI: 10.1007/s00348-009-0770-y. ISSN 0723-4864. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00348-009-0770-y>
- [36] LUMINARI, N. Ahmed body geometry. In: *PRACE Research infrastructure: Partnership for Advanced Computing in Europe* [online]. Brussels: PRACE, c2017 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <https://summerofhpc.prace-ri.eu/wp-content/uploads/2014/10/nimage001.jpg>. By SoHPC Team
- [37] HOWELL, J., D. SIMS-WILLIAMS, A. SPROT, F. HAMLIN a R. DOMINY. Bluff Body Drag Reduction with Ventilated Base Cavities. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2012, **5**(1), 152-160 [cit. 2017-05-04]. DOI: 10.4271/2012-01-0171. ISSN 1946-4002. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2012-01-0171/>
- [38] Bottom diffuser carbon for S2000: Underbody full view. In: *Password JDM: JDM parts for Honda,...* [online]. Long Beach: Password Enterprise, c2014 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://passwordjdm.com/images/Products/2422_3.jpg
- [39] Aston Martin V8 Vantage S: Stratus White Gallery. In: *Aston Martin* [online]. Warwick (United Kingdom): Aston Martin Lagonda, c2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://cdntbs.astonmartin.com/sitefinity/q2-2014-redesign/v8swhite12.jpg?sfvrsn=2>
- [40] VDOVIN, A. Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars. *Thesis for the degree of Licentiate of Engineering: Machine and Vehicle Systems* [online]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2013, **2013**(13), 48 [cit. 2017-05-12]. ISSN 1652-8565. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/176302/176302.pdf>
- [41] TELECKÝ, V. *Vliv aerodynamických sil na jízdní komfort vozidla a polohu karoserie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2016. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.
- [42] KHAJEPOUR, A., S. FALLAH a A. GOODARZI. *Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach* [online]. Wiley, 2014, 432 s. [cit. 2017-05-14]. ISBN 978-1-118-34151-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=gi4KAwAAQBAJ>
- [43] Honda Insight 2000 green. In: *Insight Central* [online]. vBulletin, c2000-2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.aaroncake.net/insight/SnakeskinGreen/Snakeskin_Green_2000_Insight_R_Passenger.jpg
- [44] Toyota Supra: Active front spoiler. In: *iMotors* [online]. c2004 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.imotors.co.uk/temp/jay/28-10-06/Dscf0444_np.jpg
- [45] Bugatti Veyron 16.4 Super Sport Review. In: *Top Speed* [online]. Top Speed [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/cars/bugatti/2011-bugatti-veyron-164-super-sport-ar93002.html>

- [46] Ford Focus – Aktivní mřížka chladiče. In: *Ford Magazin* [online]. Valašské Meziříčí: Auto Kora, c2012 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.fordmagazin.cz/1214-ford-focus-aktivni-mrizka-chladice>
- [47] GEROPP, D. *Reduktion des Strömungswiderstandes von Fahrzeugen durch aktive Strömungsbeeinflussung*. 1988. Německo. DE 3837729 C2. Uděleno 10. 1. 1991. Zapsáno 7. 11. 1988.
- [48] GEROPP, D. a H.-J. ODENTHAL. Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect. *Experiments in Fluids* [online]. 2000, **28**(1), 74-85 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1007/s003480050010. ISSN 0723-4864. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s003480050010>
- [49] WASSEN, E., S. EICHINGER a F. THIELE. Simulation of Active Drag Reduction for a Square-Back Vehicle. KING, R. *Active Flow Control II* [online]. 2010, s. 241-255 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1007/978-3-642-11735-0_16. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-11735-0_16
- [50] KANG, S. O., S. O. JUN, H. I. PARK, K. S. SONG, J. D. KEE, K. H. KIM a D. H. LEE. Actively Translating a Rear Diffuser Device for The Aerodynamic Drag Reduction of a Passenger Car. *International Journal of Automotive Technology* [online]. KSAE, c2012, **13**(4), 583–592 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1007/s12239-012-0056-x. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12239-012-0056-x>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

C_D	[-]	Součinitel aerodynamického odporu
C_{My}	[-]	Součinitel klonivého momentu
C_x	[-]	Součinitel čelního aerodynamického odporu
C_y	[-]	Součinitel aerodynamické boční síly
C_z	[-]	Součinitel aerodynamického vztlaku
F_k	[N]	Hnací síla vozidla
F_l	[N]	Vztlak
F_y	[N]	Aerodynamická boční síla
F_z	[N]	Vztlak
F_{zRear}	[N]	Vztlak zadní nápravy
M_Y	[Nm]	Klonivý moment
O_a	[N]	Aerodynamický odpor
O_c	[N]	Celkový jízdní odpor vozidla
O_p	[N]	Odpor přívěsu
O_s	[N]	Odpor stoupání
O_v	[N]	Valivý odpor
O_z	[N]	Odpor zrychlení
S_x	[m ²]	Čelní plocha vozidla
S_{xp}	[m ²]	Přibližná hodnota čelní plochy vozidla
\bar{v}	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění
v_x	[m·s ⁻¹]	Náporová rychlost proudění ve směru osy x
d	[m]	Charakteristický rozměr
h	[m]	Výška vozidla
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
l	[m]	Rozvor
w	[m]	Šířka vozidla
ν	[m ² ·s ⁻¹]	Kinematická viskozita
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>ANN</i>	Artificial Neural Network
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CFRP</i>	Carbon Fiber Reinforced Polymer
<i>DOE</i>	Design of Experiments
<i>LES</i>	Large Eddy Simulations
<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle
<i>PIV</i>	Particle Image Velocimetry